



「震源断層を特定した地震の強震動予測手法」の検証について

瀬瀬一起

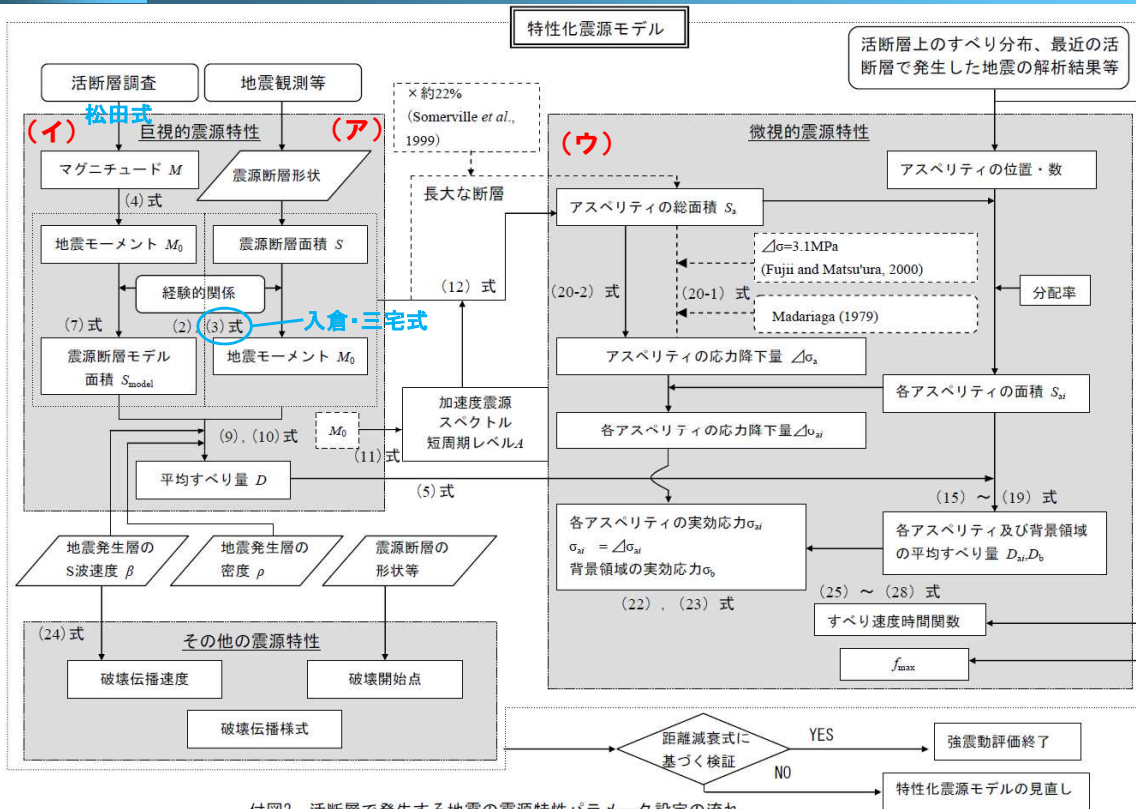
1

熊本地震による検証

- 2016年4月の熊本地震は活断層で発生した固有地震であり、かつ事前に「震源断層を特定した地震の強震動予測手法」(以下、予測手法)による予測が行われていた初めての地震。
- 2009年に確定した「予測手法」が初めてゼロから検証できるようになった。
- 鳥取県西部地震による検証(2002年)、福岡県西方沖の地震による検証(2007, 2008年)では、ゼロからの検証ではなく、巨視的震源特性は実際の地震の震源断層のものが使われている。
 - 「余震分布や強震動インバージョン等により、断層の形状は明らかにされている。そのため、鳥取県西部地震の震源断層の形状を既知とすれば、強震動評価手法を基に強震動の予測を行うことが可能になる。」(2002年検証)
 - 「震源モデルの設定において、断層面の位置や面積、地震モーメントは全ケースで同じ値とした。断層面の位置や走向・傾斜については余震分布やF-netによるモーメントテンソル解などから求め、断層幅は地震発生層を余震分布から3~19kmと設定した上で求める手順とした。」(2007年検証)

2

「予測手法」の震源特性部分



付図2 活断層で発生する地震の震源特性パラメータ設定の流れ (過去の地震記録や詳細な調査結果に基づき震源断層を推定する場合)

(ア)と(イ)に分かれているのは最初の部分だけ。それ以降の(ウ)は共通。震源特性以降の地震動の計算も共通。従って、(ア)と(イ)による結果の違いが、そのまま地震動の予測結果の違いとなって現れる。また、共通部分は鳥取県西部地震や福岡県西方沖の地震で検証済み。

技術報告書(2009)付録3付図2

熊本地震で実際に起こったこと

■ 実際に起こったこと(小林・他(2016)の解析例)

4月16日熊本地震(M_j 7.3)に対して、まず長さ54km、幅16.5kmの初期断層モデルを設定し、そのすべりの分布を強震・遠地・測地データのジョイントインバージョンによって求めた。さらにSomerville *et al.* (1999)の方法でほとんどすべていない部分をトリミングして実質的な震源断層モデルを求めると以下の通りとなる。

長さ	幅	面積	下端深さ	地震モーメント	M_w
45km	16.5km	742.5km ²	16.0km	$4.6 \times 10^{19}\text{Nm}$	7.0

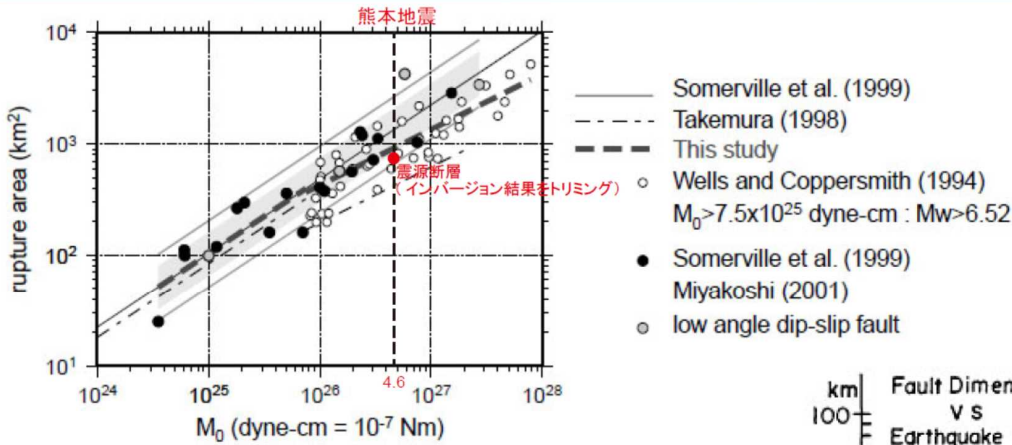
* Asano & Iwata (2016)では長さ42km、幅18km、面積756km²、下端深さ18.8km (ただし、トリミング前)。

■ 実際に起こったこと(地表地震断層など)

吉見(2016)は熊本地震による地表地震断層が現れた領域の長さを34kmと見積もった。また、国土地理院(2016)は単純な均質すべりの震源断層を求め、その合計長さを35.4kmとした。

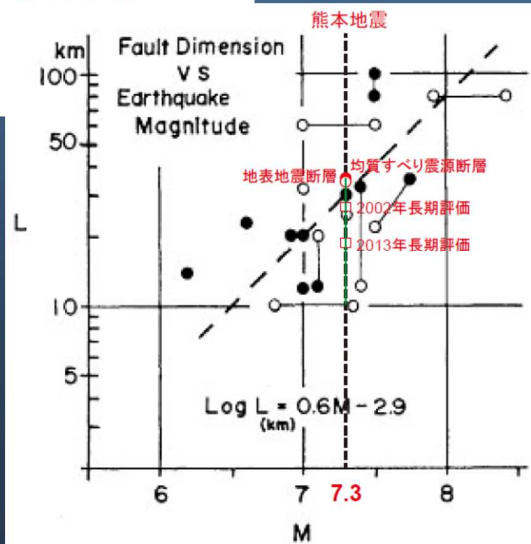
入倉・三宅式や松田式に問題はない

入倉・三宅(2001)



熊本地震の震源域に相当する活断層の長期評価は2002年と2013年に行われているが、布田川断層帯と日奈久断層帯の部分的な連動を考慮した2002年評価の方が実際に近く、地表地震断層の長さを概ね予測していた。

松田(1975)



5

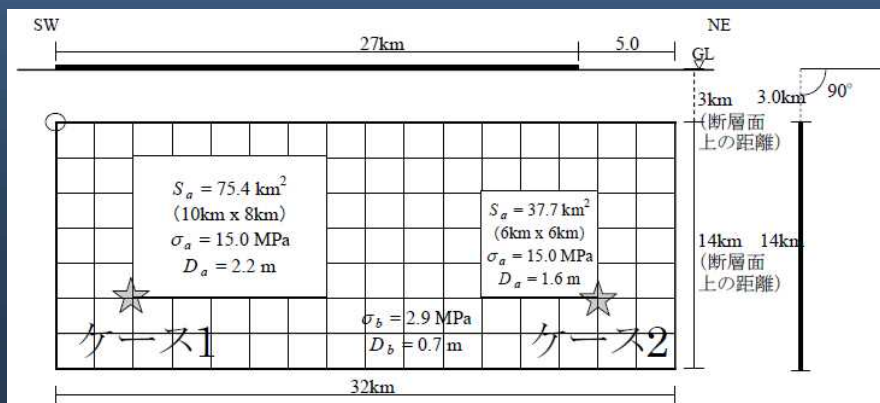
全国地震動予測地図2009年版

- 「予測手法」(イ)と2002年長期評価による。

布田川・日奈久断層帯北東部 (ふたがわ・ひなぐだんそうたいほくとらぶ)

地震諸元

コード	断層名称	断層面のずれの向き		M_j	断層長さ	断層面の幅	断層面の傾斜角	地震発生層の深さ
9301	布田川・日奈久断層帯北東部	南東側隆起の上下成分を伴う右横ずれ断層	長期評価	7.2程度	約27km	不明	地表近傍では高角	下限15km程度
			モデル化	M_w 6.7	32km	14km	90度	3-16km



「3-16km」は「3-17km」の誤植と思われる。

6

「予測手法」(ア)

(ア) 過去の地震記録などに基づき震源断層を推定する場合や詳細な調査結果に基づき震源断層を推定する場合

過去の地震記録などに基づき震源断層を推定する場合には、その知見を生かした断層モデルの設定を行う。

(b) 震源断層モデルの大きさ(長さ L ・幅 W)・深さ・傾斜角(δ)

震源断層モデルの長さ L (km)については、(a)震源断層モデルの位置・構造で想定した震源断層モデルの形状を基に設定する。幅 W (km)については、入倉・三宅(2001)による下記に示した W と L の経験的關係、

$$W = L \quad (L < W_{\max}) \dots\dots\dots (1-a)$$

$$W = W_{\max} \quad (L \geq W_{\max}) \dots\dots\dots (1-b)$$

を用いる。ここで、

$$W_{\max} = T_s / \sin \delta$$

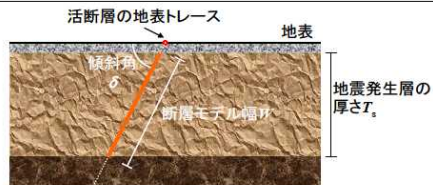
$$T_s = H_d - H_s$$

T_s : 地震発生層の厚さ(km) ($T_s \leq 20$ km)

δ : 断層の傾斜角

H_d, H_s : それぞれ地震発生層下限および断層モデル上端の深さ(km) (微小地震の深さ分布から決めることができる (Ito, 1999))

(1)式は、内陸地殻内の活断層で発生する地震の震源断層モデルの幅 W が、地震発生層の厚さ T_s に応じて飽和して一定値となることを示している。



地震発生層の厚さ T_s と断層モデル幅 W の関係

「予測手法」(ア)と2002年長期評価によれば

布田川・日奈久断層帯北東部 (ふたがわ・ひなぐだんそうたいほくとうぶ)

地震諸元

コード	断層名称	断層面のずれの向き		M_j	断層長さ	断層面の幅	断層面の傾斜角	地震発生層の深さ
9301	布田川・日奈久断層帯北東部	南東側隆起の上下成分を伴う右横ずれ断層	長期評価	7.2程度	約27km	不明	地表近傍では高角	下限15km程度
			モデル化	M_w 6.7	32km	14km	90度	3-16km

長さ	幅	面積	下端深さ	地震モーメント	M_w
45km	16.5km	742.5km ²	16.0km	4.6×10^{19} Nm	7.0

現実の震源断層

- 断層長さ L は長期評価による27km.
- 断層下端は地震発生層の下限15km.
- その結果、断層面の幅 W は12km.
- $S = L \times W = 324 \text{ km}^2$ を入倉・三宅式 $S = 2.23 \times 10^{-15} \times M_0^{2/3}$ に代入すると
 $M_0 = 5.53 \times 10^{25} \text{ dyne}\cdot\text{cm} = 5.53 \times 10^{18} \text{ Nm}$
- $M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5 = (0.743 + 18 - 9.1) / 1.5 = 6.4$
- $\log M_0 = 1.17 \cdot M_j + 10.72$ (武村, 1990) より $M_j = 6.9$.

2013年長期評価に基づく

布田川断層帯布田川区間 (ふだがわだんそうたいふだがわくかん)

地震諸元

コード	断層名称	断層面の ずれの向き	M_J (イ)	断層 長さ	断層面 の幅	断層面の 傾斜角	地震発生層 の深さ	
13001	布田川断層帯 布田川区間	「南東側隆起の上下成分を伴う右横ずれ断層」	長期 評価	7.0程度	約 19 km	11-17km程 度	高角	下限 10-13km
			モデ ル化	M_w 6.5	24km	14km	90°	3-17km

長さ	幅	面積	下端深さ	地震モーメント	M_w
45km	16.5km	742.5km ²	16.0km	4.6×10^{19} Nm	7.0

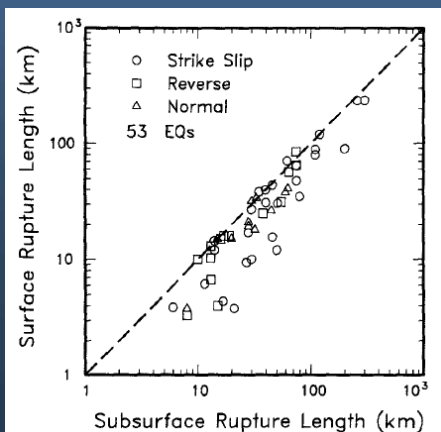
現実の震源断層

- 断層長さ L は長期評価による19km.
- 断層下端は地震発生層の下限13km.
- その結果, 断層面の幅 W は10km.
- $S = L \times W = 190 \text{ km}^2$ を入倉・三宅式 $S = 2.23 \times 10^{-15} \times M_0^{2/3}$ に代入すると $M_0 = 2.49 \times 10^{25} \text{ dyne-cm} = 2.49 \times 10^{18} \text{ Nm}$
- $M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5 = (0.396 + 18 - 9.1) / 1.5 = 6.2$
- $\log M_0 = 1.17 \cdot M_J + 10.72$ (武村, 1990) より $M_J = 6.6$ (ア)

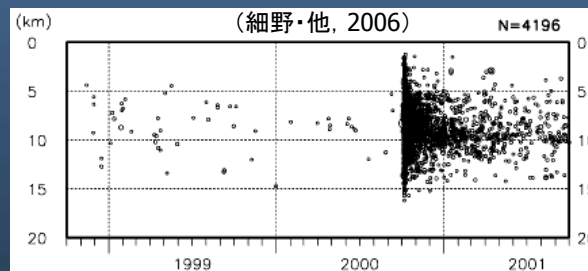
9

「予測手法」(ア)はなぜうまくいかないのか？

- 大地震の震源断層の下端は地震発生層からさらに深い部分に及ぶことが多い.
- 震源断層は地表には現れない部分が存在し, その長さは地表地震断層より長いことが多い.
- 結果として, 幅も長さも短く予測されてしまうので, 面積がかなり小さく決まってしまう(熊本地震では実際の半分以下). そのため, 面積から決まる M が過小評価となる.



Wells & Coppersmith (1994)



鳥取県西部地震

「断層幅は地震発生層を余震分布から3~19kmと設定した上で求める手順とした。」(2007年検証)

幅	15 km 程度 (北西部、南東部とも)	○	傾斜と地震発生層の下限の深さ (15 km 程度) から推定。
---	-------------------------	---	---------------------------------

(2007年警固断層長期評価)

福岡県西方沖の地震

10

「予測手法」(イ)はなぜうまくいくのか？

- (イ)でMを決めるときには面積ではなく長さのみを使う。
- 松田式は古い式であるため、震源断層長さではなく、地表地震断層の長さや均質すべりモデルの長さ、実際に起こった地震のMをデータとして作られた。
- そのため、松田式に短めの長さを与えても、そこそこのMが得られる。

Earthquake			Fault				
Year	Location	M	Name	Length (km)	Displacement (m)	Ref*	**
1891	Nobi	8.4 (7.9)	Neodani, etc.	80	8	1)	○
1894	Shonai	7.3 (6.8)	Yadarezawa	10	1	2)	○
1896	Riku-U	7.5 (7.0)	Senya Kawafune	60 15	3 2	2)	○
1927	Tango	7.5	Gomura, etc. Yamada	18 7.5 L=22	2.5 0.8	2)	○
1930	N-Izu	7.0	Tanna, etc. Himenoyu	30 6 L=32	3.3 1.2	2)	○
1931	W-Saitama	7.0		20	1	4)	●
1943	Tottori	7.4	Shikano Yoshioka	8 4.5 L=12 33	1.5 0.9 2.5	2)	○
1945	Mikawa	7.1	Fukoze Yokosuka	9 7 L=20 12	2 0.6 2.2	2) 5) 6)	○
1948	Fukui	7.3		25 30	2.3 2.5	2) 3)	○ ●
1961	N-Mino	7.0	Koike- Hatogayu	12	2.5	7)	●
1963	Echizen- misaki	6.9		20	0.6	4)	●
1964	Niigata	7.5 7.4		100	9 4	8) 9)	○ ●
1969	C-Gifu	6.6		23	0.7	10)	●
1970	S-Akita	6.2		14	0.65	11)	●

Gothic figures are used in Fig. 1.

* Reference: 1) MATSUDA (1974a), 2) YONEKURA (1972), 3) KANAMORI (1973), 4) ABE (1974), 5) INOUE (1950), 6) ANDO (1974), 7) KAWASAKI (1975), 8) MOGI, et al. (1964), 9) AKI (1966), 10) MIKUMO (1973), 11) MIKUMO (1973).

** ○: values of surface faulting, ●: values obtained from seismological or geodetic data.

松田(1975)

11

まとめ

- たとえ詳細な調査が行われたとしても、活断層や地震発生層の調査から将来の地震の震源断層の面積を精度よく推定することは困難であることが、熊本地震の実例で明らかになった(熊本県が1996年と1998年に詳細な調査を実施)。
- そのため、震源断層面積から予測を始める(ア)より、活断層調査で精度よく求まると言われる地表地震断層の長さなどから予測を始める(イ)の方が安定的である可能性が高い。全国地震動予測地図では活断層の地震に対して(イ)のみを用いている。
- 以上を踏まえ、「予測手法」における(ア)のセクションタイトルを、「(ア) 過去の地震記録などに基づき震源断層を推定する場合や詳細な調査結果に基づき震源断層を推定する場合」から「(ア) 過去の地震記録などに基づき震源断層を推定する場合」に替えたかどうか。
- 同じく(イ)のセクションタイトルを、「(イ) 地表の活断層の情報をもとに簡便化した方法で震源断層を推定する場合」から「(イ) その他の場合」に替えたかどうか。

12

まとめ (2)

- 2016年「予測手法」の前文1頁において、「なお、上記の「レシピ」は、個々の断層を個別に取り上げて、……やや簡便化した方法が作業上有効と考えられるので、それも併せて掲載する。」の段落を削除したらどうか。
- 同2頁において、「ここでは、過去の地震記録などに基づく震源断層を用いる場合や……巨視的震源特性の設定方法を解説する。」の文を削除してはどうか。
- 付図2の図面に(ア), (イ), (ウ)を記入する。また、キャプションから「(過去の地震記録や詳細な調査結果に基づき震源断層を推定する場合)」を削除する(これはわかりにくい表記の訂正)。
- 付図3のキャプションを「(イ)における震源特性パラメータ設定の詳細な流れ」に替えてはどうか。